مقایسه‌ی کاربرد مدل‌های آشفتگی RSM و LES در پیچ تند★

جواد مظفری[۱]   امیر صمدی[۲]   سید اسدالله محسنی موحد[۳]   داود داودمقامی[٤]

چکیده *شناخت الگوی جریان و مکان‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در پیچ آبراهه‌ها دارای اهمیت زیادی می‌باشد. اما استفاده از مدل‌های فیزیکی و بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در پیچ‌ها دارای محدودیت است و مدل‌های ریاضی می‌توانند کمک شایانی به شناخت الگوی جریان در پیچ‌ها کنند. در این تحقیق، مدل‌های آشفتگی RSM و LES در پیچ تند یک آبراهه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مقایسه شده‌اند. آبراهه‌ی آزمایشگاهی، کانالی با پیچ تند است که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه EPFL مستقر می‌باشد. برای بررسی مدل‌های آشفتگی، از پارامترهای متوسط‌گیری شده در عمق استفاده گردید. هم‌چنین برای بررسی کمی مدل‌های آشفتگی، تعدادی پروفیل سرعت طولی انتخاب شد و با پروفیل‌های اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. نتایج بررسی سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق نشان داد که مدل RSM توانایی تعیین دقیق نقاط مهم جریان را ندارد. این مدل، منطقه‌ی جداشدگی جریان را در زاویه‌ی ۸۵ درجه و با بیشینه عرض ٤۰ درصد نشان می‌دهد در حالی‌که در اندازه‌گیری‌ها، این منطقه دارای بیشینه عرض ٦۰ درصد عرض کل و در حدود زاویه‌ی ۷۵ درجه واقع می‌باشد. در مقابل، مدل LES به صورت مناسبی منطقه جداشدگی را نشان می‌دهد و موقعیت‌های بیشینه سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق را نیز مناسب‌تر از مدل RSM مشخص می‌کند. بررسی سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق نیز نشان داد که موقعیت‌های تغییر جریان عرضی به‌وسیله‌ی مدل LES مناسب‌تر از مدل RSM شناخته شده است. نهایتاً مقایسه‌ی کمی پروفیل‌های سرعت نشان داد که مدل LES خطای کمتری دارد و نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد.*

واژه‌های کلیدی پیچ تند، فلوئنت، سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، مدل‌آشفتگی.

Comparison of RSM and LES Turbulence Models on Sharp Bend

J. Mozaffari   A. Samadi   S. A. Mohseni Movahhed   D. Davoud-Maghami

Abstract *Recognizing of river flow pattern, deposition and erosion areas in meanders is highly important. Despite the limitations of the physical models in laboratory investigation of flow pattern in meanders, mathematical models can be helpful. In this research, RSM and LES turbulence models have been compared on sharp river bend of a laboratory flume using Fluent Software. The Laboratory flume is a sharp river bend established in hydraulic laboratory of EPFL. In order to investigate turbulence models, depth-averaged parameters were used. Moreover, to quantitatively examine those models, some longitudinal velocity profiles were selected and compared with measured ones. Results of longitudinal depth averaged velocities showed that RSM model is not able to precisely determine the important flow points. This model shows flow separation region within 85 degree and maximum width of 40 percent, though measurements indicated it was located in the region with maximum width of 60 percent of total width and approximately 75 degree. On the contrary, LES model suitably shows separation region. Besides, it better determines maximum measured depth averaged velocity situations rather than RSM model. Investigation of transversal depth-averaged velocity distinguished LES model from RSM as the better model and finally quantitative comparison of velocity profiles showed LES model is more accurate and presents more valid authentic results.*

Keywords Depth-Averaged Velocity, Fluent, Sharp Bend, Turbulence Model.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۵/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/۳/۲۲ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک.

(۲)نویسنده‌ی مسئول: استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره).

(۳) استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک.

(٤) کارشناس، گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک.

مقدمه

اکثر رودخانه‌ها به‌صـــورت پیچانرود هســـتند و دارای جریان ثانویه‌ی قوی می‌باشند که سبب رسوبگذاری در ساحل داخلی و فرسایش در ساحل خارجی می‌گردد. از طرفی دهانه‌ی آبگیر در پیچ رودخانه بایســـتی در مکانی قرار بگیرد که حداکثر میزان قدرت جریان ثانویه در آنجا باشد. این مسأله سبب می‌گردد که رسوبات در ساحل خارجی به سمت ساحل داخلی حرکت کنند و کمترین میزان رســـوب وارد دهانه‌ی آبگیر شـــود. هم‌چنین، تغییرات در پیچ رودخانه‌ها و فرسایش دیواره و بســتر آنها، ســبب حرکت و مهاجرت پیچ رودخانه و تخریب تأســیســات اطراف آن و اراضــی کشــاورزی و ایستگاه‌های پمپاژ مجاور می‌گردد که نشان‌دهنده‌ی نیاز به شناخت الگوی جریان و مکان بیشینه جریان ثانویه و تنش برشی در پیچ به‌وسیله‌ی مدل‌های ریاضی است.

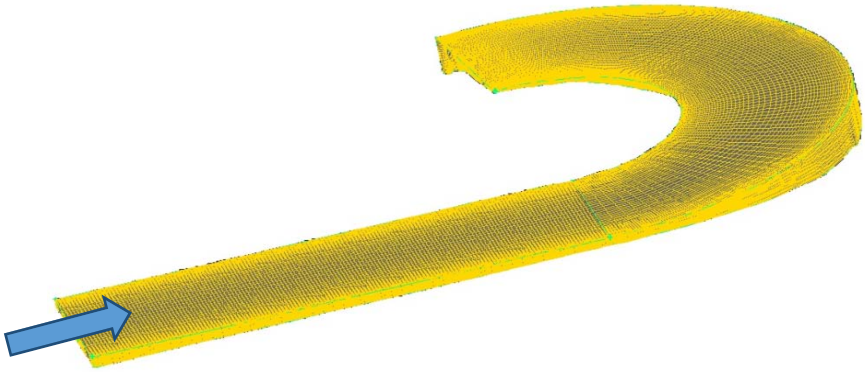
شتار (Shettar) و مورتی (Murthy) [1] در سال ۱۹۹۶ برای شبیه‌سازی عددی جریان در حالت آشفته، از معادلات رینولدز متوســطگیــری شــده در عمق برای حالت دوبعــدی اســتفاده کردنــد. صــفرزاده گندشمین و صالحی نیشابوری [۲] در سال ۱۳۸۵ برای بررسی الگوی جریان در آبگیر جانبی از نرم‌افزار فلوئنـــــــت اســـتفاده نمودند. ایشـــان برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل‌های دو معادله‌ای k-ε استاندارد وk-ω استفاده کرده و عملکرد مدل k-ω را در پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای و جدایی جریان، بهتر از مدل k-ε ارزیابی کردند. امیدبیگی و همکاران [۳] در سال ۱۳۸۹ به بررسی عددی ساختار سه‌بعدی جریان در آبگیر جانبی پرداختند. ایشان بـرای مدل سازی آشـــــفتگی از مدل‌های k-ε، k-ω و RSM استفاده کردند. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که الگوی جریان داخل کانال اصلی‌به‌وسیله ی هر سه مدل به‌خوبی پیش‌بینی شـده اما در کانال آبگیر، مدل RSM نسبت به دو مدل دیگر بهتر عمل کرده و قابلیت مدل k-ω بیشتر از مدل k-ε می‌باشــد. شــاملو و همکاران [٤] در ســال ۱۳۸۹ به بررسی ناحیه‌ی جدایی جریان در آبگیر جانبی پرداختند. ایشـــان براســـاس نتایج به‌دست آمده گزارش نمود ند که مدل آشفتگی RSM به علت عدم اعمال محدودیت هموژنی لزجت گردابه‌ای، در پـــیش‌بینی الگوی جریان بهتر از سایر مدل‌های به کار رفته عمل می‌نماید. هان (Han) [5] در سال ۲۰۱۰ به بررسی سه مـدل k-ε، RNG، LES و RSM در یـک پیچ تنـد پرداخت و نتیجه گرفت که مدل RSM تطابق مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. ون بالن (Van Balen) و همکاران [6] در سال ۲۰۰۹ به بررسی مدل LES در پیچ ملایم کانال پرداختند. هم‌چنین تحقیقات بویج (Booij) [7]، درگـاهی [8]، کـانـگ و چوی [9] و خسرونژاد و همکاران [10] نیز نشان دادند که مدل k-ε دارای محدودیت‌هایی در پیش‌بینی صحیح میزان جریان ثانویه است و تخمین ضعیف‌تری از ناحیه‌ی جداشدگی می‌نماید. از این‌رو، به‌نظر می‌رسـد برای شـناخت کامل الگوی جریان در پیچ‌ها، بایســـتی آزمایش‌های بســـیار زیادی را در آزمایشـــگاه و در پیچ‌های با اندازه‌های متفاوت انجام داد که انجام آن به سادگی میسر نیست. بنابراین هدف اصـــلی انجام این پژوهش، بررســـی و مقایسه‌ی توانایی مدل‌های عددی آشفتگی در شناخت الگوی جریان در پیچ‌های تند می‌باشـــد تا در صـــورت امکان با کمک آن‌ها بتوان با آزمایش‌های بسـیار کمتر و برای شرایط مختلف، الگوی جریان را پیش‌بینی نمود.

مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشـــگاهی این پژوهش در آزمایشـــگاه هیدرولیک دانشـــگاه EPFL لوزان ســـوئیس، بر روی فلومی از جنس پلکسی گلاس، با زاویه‌ی مرکزی ۱۹۳ درجه انجام گردید. شـعاع خط مرکزی R برابر ۱/۷ متر می‌باشـــد که بیانگر نســـبت R/B برابر با ۱/۳ متر و نشان‌دهنده‌ی یک خم با پیچ تند می‌باشد. کف کانال از رسوباتی به قطر ۲ میلی‌متر پر شده است که پس از سه هفته تزریق رســـوب و ایجاد توپوگرافی توســـعه یافته، برای انجام آزمایش‌ها منجمد گردیده است. جدول (۱) خلاصه‌ای از شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات جریان در فلوم آزمایشگاهی

رینولدز برشی	نسبت عرض به عمق	نسبت شعاع قوس به عمق	نسبت شعاع قوس به عرض	عدد فرود	عدد رینولدز	شیب انرژی	سرعت برشی متوسط	سرعت متوسط جریان	عمق متوسط فلوم	دبی
Re* (-)	B/H (-)	R/H (-)	R/B (-)	Fr (-)	Re (-)	Sf (-)	U* (ms-1)	U (ms-1)	H (m)	Q (ls-1)
۱۸۷	۱۳	۱۷	۱/۳۱	۰/٥	٤۳۰۰۰	۰/۰۰٤	۰/۰٥٦	۰/٤۹	۰/۰۹۸	٦۳



شکل ۱ شبکه‌ی محاسباتی ایجاد شده در نرم‌افزار گمبیت

مدل‌های مورد استفاده در نرم افزار فلوئنت

نرم‌افزار فلوئنت برای اجرا و شبیه‌سازی الگوی سه‌بعدی جریان می‌باشد [11]. مدل هفت معادله‌ای تنش رینولدز (RSM) از سری معادلات ناویر- استوکس با رینولدز متوسط زمانی (RANS) می‌باشد که در این پژوهش به‌کار رفته است. مدل شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ (LES) نیز با مدل‌سازی گردابه‌های بزرگ، الگوی جریان را تعیین می‌کند. بنابراین مدلی با هزینه‌های اجرایی کمتر از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) و هزینه‌های اجرایی بیشتر از مدل‌های RANS می‌باشد. مدل LES یک مدل فیلتر را برای نشان دادن رفتار پیچه‌های کوچک فرض می‌کند و ساختار پیچه‌های بزرگ سه‌بعدی وابسته به زمان را در جریان آشفته محاسبه می‌کند.

برای اجرای نرم‌افزار فلوئنت ابتدا بایستی شبکه‌ی جریان در کانال مورد نظر ساخته شود. برای شبکه‌سازی از نرم‌افزار گمبیت (Gambit) استفاده شده است. در این تحقیق ۹۱۰ هزار گره محاسباتی در نرم‌افزار تشکیل شده است. این شبکه‌ی محاسباتی نهایتاً پس از آزمون چندین شبکه‌ی مختلف در نرم‌افزار گمبیت و سپس فلوئنت و با کوچک کردن شبکه تا حد ممکن به‌دست آمد. در نزدیک دیواره، شبکه‌ی محاسباتی تا اندازه‌ای که در نرم‌افزار گمبیت امکان داشته و ایجاد حجم منفی نکرده، ریز شده است. مقدار عبارت U_*K_s / υ بزرگ‌تر از ۷۰ می‌باشد و در نتیجه جریان کاملاً زبر است و زیرلایه‌ی لزج وجود نخواهد داشت. شبکه‌ی محاسباتی به‌صورتی انتخاب شده بود که تا حد امکان، Y^+ در محدوده‌ی لایه‌ی میانی (Buffer Layer) قرار نگرفته باشد و بیشتر از ۳۰ شود.

شکل (۱) کانال را با شبکه‌ی محاسباتی نشان می‌دهد. قابل ذکر است که کف کانال از یک توپوگرافی توسعه‌یافته تشکیل شده است و بنابراین اندازه‌ی دیواره خارجی بیشتر از دیواره‌ی داخلی در شبکه‌ی اندازه‌گیری می‌باشد. در این شبکه‌ی محاسباتی ٦٥ گره در عرض کانال، ۳٥ گره در ارتفاع و ٤۰۰ گره در طول کانال ایجاد شده‌است. در گره‌های موجود در عرض کانال با نزدیک‌تر شدن به دیواره‌ی جانبی، فاصله‌ی گره‌ها نیز کاهش یافته است.

در مرحله‌ی بعد، شبکه‌ی محاسباتی وارد نرم‌افزار فلوئنت می‌گردد. ارتفاع زبری کف برابر با ۰/۰۰٦۷ متر برطبق روابط ون راین (Van Rijn) [12] در سال ۱۹۸٤ در نظر گرفته شده است. طبق رابطه‌ی ون راین، زبری بستر برابر است با :

$$K_s = 3d_{50} + 1.1\Delta(1 - e^{25\Delta/\lambda}) \quad (۱)$$

که در این رابطه Δ ارتفاع دیون ها و λ طول دیون‌ها می‌باشد. هم‌چنین $\lambda = 7.3h$ می‌باشد که h برابر با عمق آب است. ارتفاع دیون‌ها نیز از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Delta}{h} = 0.11\left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0.3}(1 - e^{-0.5T})(25 - T) \quad (۲)$$

$$T = \frac{(u_*)^2 - (u_{*c})^2}{(u_{*c})^2} \quad (۳)$$

که در آن، u_{*c} سرعت بر شی بحرانی می‌باشد که از دیاگرام شیلدز به‌دست می‌آید و $u_* = \frac{\bar{u}\sqrt{g}}{C'}$ می‌باشد. $\bar{u}$ نیز سرعت متوسط جریان و C' ضریب شزی ذره می‌باشد که برابر است با:

$$C' = 18\log\left(\frac{12R_b}{3d_{90}}\right) \quad (٤)$$

که در این رابطه، R_b شعاع هیدرولیکی می‌باشد.

شرایط مرزی استفاده شده نیز عبارتند از:

۱- ورودی (Input): برای ورودی شرط مرزی mass-flow-inlet یا دبی جرمی ورودی در نظر گرفته شده است.

۲- خروجی (Output): شرط خروجی Pressure-outlet قرار داده شده است.

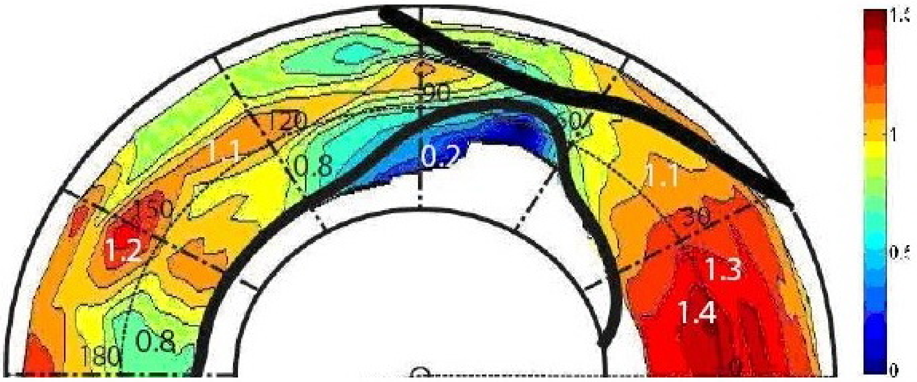
۳- دیواره (Wall): برای دیواره‌ی خارجی و داخلی که از جنس پلکسی گلاس می‌باشند، شرط مرزی wall درنظرگرفته شده و زبری آن برابر زبری PVC می‌باشد. زبری کف نیز برابر ۰/۰۰٦۷ قرار داده شده‌است.

٤- سطح (Surface): برای سطح آب، شرط مرزی symmetry قرار داده شده‌است. بدین معنی که سرعت عمودی در سطح آب، صفر درنظرگرفته می‌شود. نکته‌ای که در انتخاب این شرط مرزی مورد نظر می‌باشد، این است که در صورتی این شرط قابل استفاده است که سطح آب مشخص باشد و مانند یک دیواره در نظر گرفته شود. در پیچ‌ها به‌دلیل تغییرات موجود در سطح آب که توسط نیروی گریز از مرکز ایجاد می شود، سطح آب در دیواره‌ی خارجی بالاتر از دیواره‌ی داخلی می‌باشد و درنظر گرفتن یک سطح آب با ارتفاع ثابت می‌تواند خطا ایجاد کند. به‌هر حال در تحقیقاتی که توسط ون بالن و همکاران [6] بر روی پیچ‌های ملایم و تند انجام شد، بیان گردید که مقدار این خطا ناچیز می‌باشد و تأثیر آن بر روی الگوی جریان قابل صرف‌نظر کردن است. قابل ذکر است که برای از بین بردن خطای مذکور در شبکه‌ی محاسباتی، از سطح آب اندازه‌گیری شده استفاده گردید. بدین ترتیب شبکه‌ی محاسباتی در فضای واقعی بین توپوگرافی توسعه‌یافته و سطح واقعی آب طراحی شده‌است.

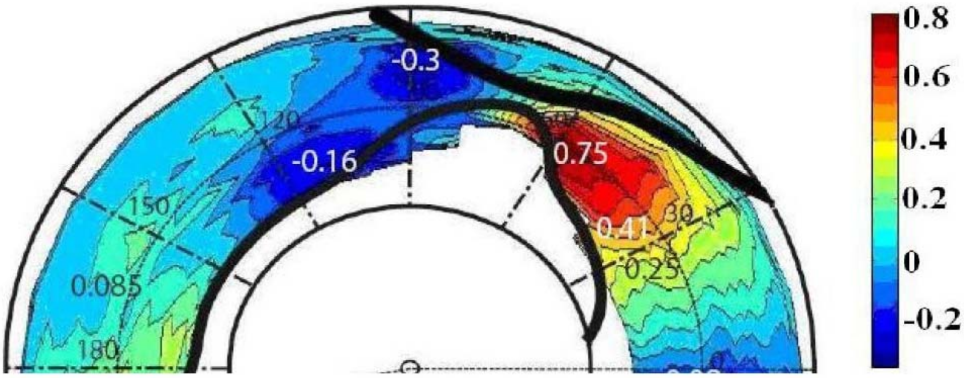
نتایج و بحث

کمیت‌های متوسط‌گیری‌شده در عمق معمولاً برای تشریح سیمای عمومی میدان جریان و توزیع سرعت در جریان‌های سه‌بعدی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۲) سرعت طولی متوسط‌گیری‌شده در عمق (Us) را که با سرعت متوسط جریان نرمالیزه شده است (Us/U) نشان می‌دهد. جریان تا حدود مقطع عرضی ۳۰ درجه دارای جدا شدگی از دیواره‌ی داخلی نمی‌باشد. منطقه‌ی جداشدگی بین ۳۰ و ۱۲۰ درجه می‌باشد و دارای بیشینه عرض حدود ۷۵ درجه است که در حدود ٦۰ درصد عرض کل می‌باشد.

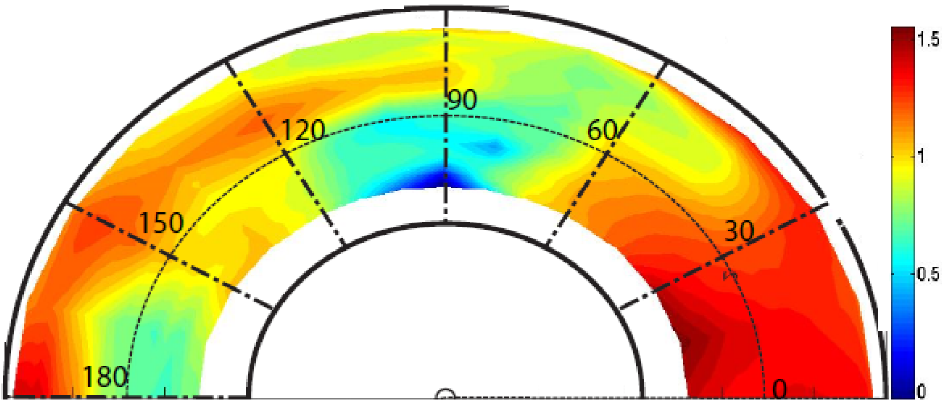
شکل (۳) تغییرات سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق (Un) را که با سرعت متوسط جریان نرمالیزه شده است (Un/U) نشان می‌دهد. از حدود مقطع عرضی ۱۵ درجه تا مقطع عرضی ۷۵ درجه، مقدار متوسط‌گیری‌شده‌ی سرعت عرضی مثبت است و به سمت ساحل خارجی می‌باشد. از مقطع عرضی ۷۵ درجه تا نزدیک ۱۳۵ درجه، عمدتاً مقدار سرعت عرضی متوسط‌گیری‌شده در عمق، منفی و رو به ساحل داخلی می‌باشد. از مقطع ۱۳۵ درجه به سمت خروجی خم، دوباره این مقدار مثبت گردیده است.



شکل ۲ تغییرات سرعت طولی متوسط‌گیری‌شده در عمق (Us/U) – براساس مدل آزمایشگاهی



شکل ۳ تغییرات سرعت عرضی متوسط‌گیری‌شده در عمق (Un/U)– براساس مدل آزمایشگاهی



شکل ٤ سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق (Us/U)– پیش‌بینی شده با مدل RSM

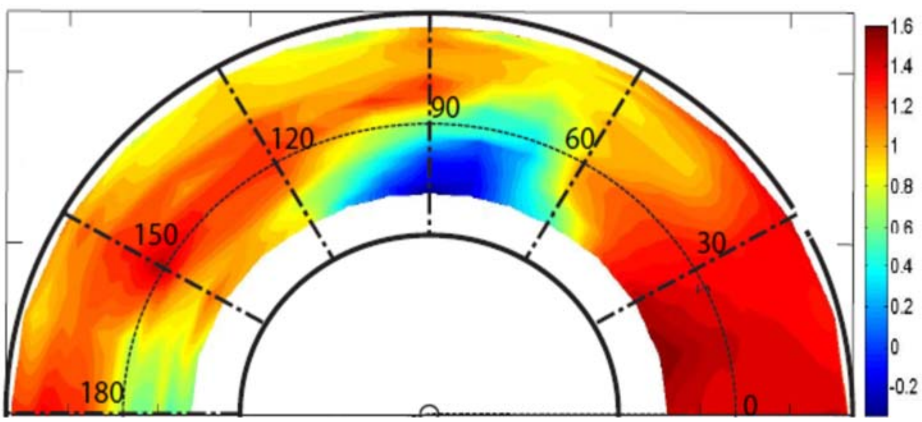
بررسی و مقایسه‌ی الگوهای متوسط‌گیری شده

الگوهای متوسط‌گیری شده در عمق به‌صورت مستقیم از نرم‌افزار فلوئنت به‌دست نمی‌آیند. برای تعیین این الگوها در ابتدا پروفیل‌های سرعت طولی در

موقعیت‌هایی از کانال که در آزمایشگاه نیز اندازه‌گیری شده بود به‌دست آمد. این موقعیت‌ها عبارتند از ۱۵ مقطع که در هر مقطع عرضی ۳۰ پروفیل سرعت استفاده شده‌است. در مرحله‌ی بعد، از نقاط موجود در هر پروفیل سرعت میانگین‌گیری وزنی شد تا مقدار متوسط‌گیری شده‌ی آن در عمق به‌دست آید. سپس این مقادیر وارد برنامه‌ی متلب (Matlab) شد و الگوهای متوسط‌گیری شده در عمق رسم شدند. شکل (٤) سرعت طولی متوسط‌گیری شده در عمق را که توسط مدل هفت معادله‌ای تنش رینولدز پیش‌بینی شده‌است نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (٤) هم‌چنان ناحیه‌ی بیشینه سرعت در مقطع بین ۰ تا ۳۰ درجه متمایل به‌سمت داخلی قوس پیش‌بینی شده است. اما همان‌طور که قبلاً بیان شد، ناحیه‌ی بیشینه سرعت اندازه‌گیری شده در مرکز قرار دارد. بین مقاطع عرضی ۳۰ و ٦۰ درجه سرعت بیشینه به سمت ساحل داخلی متمایل است در حالی که مقدار اندازه‌گیری شده به‌سمت ساحل خارجی است و متفاوت با پیش‌بینی می باشد. ناحیه‌ی جداشدگی هم‌چنان در مقطع عرضی ۹۰ درجه پیش‌بینی شده‌است که تا حدودی به سمت زاویه‌ی قوس ۸۰ درجه نیز حرکت کرده‌است اما هنوز با منطقه‌ی جداشدگی اندازه‌گیری شده کاملاً متفاوت است. هم‌چنین منطقه‌ی جدا شدگی اندازه‌گیری شده تا خط مرکزی کانال پیشروی کرده‌است اما مقدار پیش‌بینی شده در مدل تنها ناحیه‌ی کوچکی را در بر می‌گیرد. از مقطع عرضی ۹۰ تا ۱۲۰ درجه از خط مرکزی تا ساحل خارجی، پیش‌بینی و اندازه‌گیری یکسان می‌باشند اما از خط مرکزی به سمت ساحل داخلی مقدار پیش‌بینی شده همان ناحیه‌ی جداشدگی را نشان می‌دهد که متفاوت با اندازه‌گیری می‌باشد. از مقطع عرضی ۱۲۰ درجه تا مقطع عرضی ۱۸۰ درجه، مقدار بیشینه سرعت پیش‌بینی شده به سمت ساحل خارجی می‌باشد و تا خروجی پیچ در ساحل خارجی جای گرفته‌است اما مقدار اندازه‌گیری شده‌ی آن تا حدودی متفاوت است و از مقطع عرضی ۱۵۰ درجه در ساحل خارجی جای می‌گیرد.

شکل (۵)، سرعت طولی متوسط‌گیری‌شده در عمق را که با مدل LES پیش‌بینی شده‌است نشان می‌دهد. در این شکل نیز در مقطع ۰ تا ۳۰ درجه، هسته بیشینه سرعت در سمت ساحل داخلی قرار دارد اما تا حدودی به سمت مرکز نیز متمایل شده است.



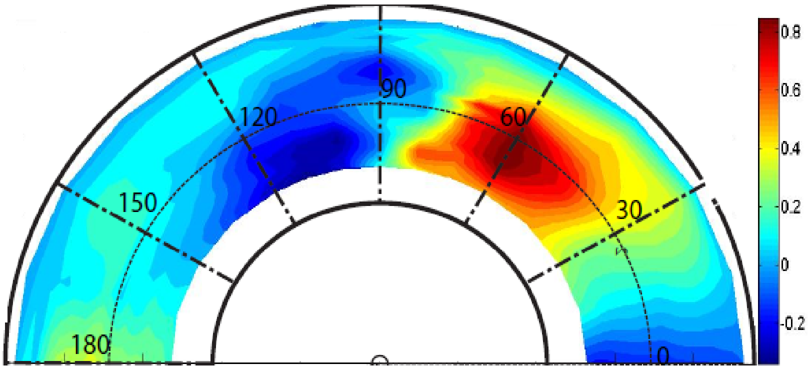
شکل ۵ سرعت طولی متوسط‌گیری‌شده در عمق (Us/U)– پیش‌بینی‌شده با مدل LES

بین مقاطع عرضی ۳۰ تا ۶۰ درجه، پیش‌بینی جریان توسط مدل LES نشان می‌دهد که هسته‌ی مرکزی بیشینه سرعت به‌سمت ساحل خارجی حرکت کرده است که با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی منطقه‌ی جداشدگی جریان که توسط مدل پیش‌بینی شده‌است تقریباً در مقطع ۷۵ درجه قرار دارد که نزدیک به مقدار پیش‌بینی شده‌است. این در حالی است که بیشینه‌ی منطقه‌ی جداشدگی در مدل RSM که بر اساس ایده‌ی بوزینسک ارائه شده‌است در مقطع عرضی ۸۵ درجه قرار گرفته‌است و با مقادیر اندازه‌گیری‌شده تطابق ندارند. اما منطقه‌ی جداشدگی در مدل LES، متمایل به سمت مقطع عرضی ۷۵ درجه شده‌است و تقریباً با مقادیر اندازه‌گیری‌شده تطابق پیدا کرده‌است. از مقطع ۱۵۰ درجه به سمت خروجی، پیش‌بینی مدل نشان‌دهنده‌ی قرارگیری هسته‌ی بیشینه در ساحل خارجی می‌باشد که این بخش نیز با اندازه‌گیری‌ها تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. از مقطع ۹۰ تا ۱۲۰ درجه، مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌شده تقریباً یکسان می‌باشند و هسته‌ی بیشینه سرعت در هر دو الگوی جریان بین خط مرکزی و ساحل خارجی قرار دارد. در بین مقاطع ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه نیز الگوی پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده تطابق مناسبی را نشان می‌دهند. هسته‌ی بیشینه‌ی جریان هنوز در نزدیکی خط مرکزی و متمایل به ساحل خارجی است که با نزدیک شدن به مقطع ۱۵۰ درجه تا حدودی به ساحل خارجی نزدیک‌تر می‌گردد.

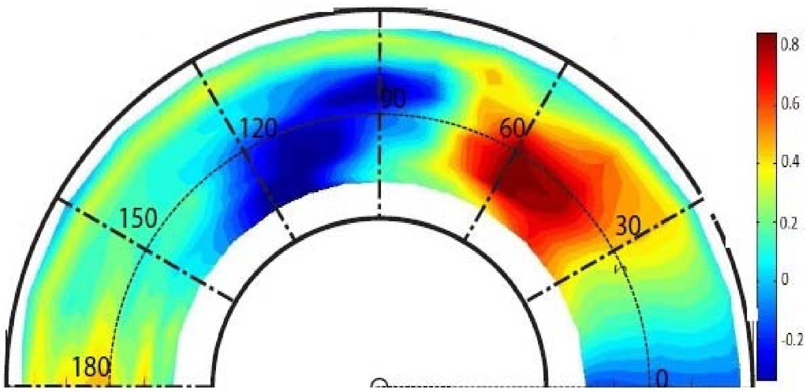
مقایسه‌ی سرعت طولی متوسط‌گیری‌شده در عمق که به‌وسیله‌ی این دو مدل پیش‌بینی شده است نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی جداشدگی جریان، مدل RSM جریان برگشتی آب را پیش‌بینی نکرده‌است و حداقل سرعت را صفر نشان داده اما مدل LES سرعت ۰/۲- را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی برگشت آب و وجود گرداب در این منطقه می‌باشد. البته ناحیه‌ی مذکور به‌دلیل عمق کم در آزمایشگاه اندازه‌گیری نشده است.

شکل (٦) نیز سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق را که توسط مدل تنش رینولدز پیش‌بینی شده است نشان می‌دهد.

مقدار بیشینه‌ی سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق در مقطع ٦۰ درجه اتفاق افتاده است که مقدار پیش‌بینی شده کمی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد ولی هر دو مقدار در یک موقعیت اتفاق افتاده‌اند. از مقطع ورودی تا حدود مقطع عرضی ۷۵ درجه، مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان‌دهنده‌ی سرعت عرضی متوسط‌گیری شده‌ی مثبت و به سمت ساحل خارجی می‌باشد و پس از آن تا مقطع عرضی ۱۳۵ درجه، مقدار آن منفی و به سمت ساحل خارجی می‌باشد و پس از آن دوباره به سمت ساحل خارجی تغییر جهت می‌دهد. در مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل، سرعت عرضی متوسط‌گیری‌شده در عمق از ورودی تا حدود مقطع عرضی ۸۰ درجه به سمت ساحل خارجی می‌باشد و سپس مقدار آن منفی شده و تا حدود مقطع عرضی ١٤۰ درجه به سمت ساحل داخلی می‌باشد. پس از آن دوباره به سمت ساحل خارجی برمی‌گردد و مقدار آن مثبت می‌شود. مقایسه‌ی سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق بین مدل مذکور و مقدار اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده‌یی اختلاف تقریباً ۵ درجه‌ای می‌باشد. در مقاطع عرضی ۹۰ تا ۱۲۰ درجه، هسته بیشینه سرعت عرضی در الگوی مشاهده‌ای نزدیک به ساحل خارجی است درحالی‌که در مدل محاسباتی نزدیک به ساحل داخلی می‌باشد. لذا این مقادیر صحیح پیش‌بینی نشده‌اند. مدل مذکور الگوی جریان را به‌صورت کلی صحیح پیش‌بینی کرده است اما در پیش‌بینی مقادیر بیشینه و موقعیت آن دارای عدم تطابق‌هایی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده می‌باشد.



شکل ٦ سرعت عرضی متوسط‌گیری‌شده در عمق (Un/U)– پیش‌بینی‌شده با مدل RSM



شکل ۷ سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق (Un/U)– پیش‌بینی‌شده با مدل LES

شکل (۷) سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق را که با مدل LES پیش‌بینی شده‌است نشان می‌دهد. این مدل همانند مدل پیشین دارای پیش‌بینی تقریباً مشابهی برای الگوی سرعت عرضی متوسط‌گیری‌شده در عمق می‌باشد. در بین فاصله‌ی مقاطع ۹۰ تا ۱۲۰ درجه، دو سرعت عرضی بیشینه را پیش‌بینی کرده‌است که دارای موقعیت یکسان با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند اما مقدار بیشینه‌ی نزدیک به ساحل داخلی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی شده‌است.

الگوی پیش‌بینی‌شده‌ی سرعت عرضی از مقطع ورودی تا حدود مقطع عرضی ۷۵ درجه مثبت و به سمت ساحل خارجی می‌باشد و این روند تا حدود مقطع ۱۳۵ درجه ادامه دارد. پس از آن الگوی جریان منفی شده و به سمت ساحل داخلی قرار گرفته است. این پیش‌بینی روند بهتری را نسبت به مدل پیشین نشان می‌دهد. در مدل قبل اختلاف تقریباً ٥ درجه‌ای بین الگوی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده وجود داشت که این اختلاف در مدل LES از بین رفته است.

مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت طولی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده

جدول (۲) مقدار متوسط خطا را در مقاطع عرضی انتخاب شده مشخص کرده است. در این جدول ابتدا

مقدار خطای چهار پروفیل سرعت طولی انتخاب‌شده از هر مقطع عرضی، تعیین گردیده و سپس متوسط خطای آن‌ها مشخص شده‌است. به‌طور مثال، خطای مدل LES در مقطع عرضـــی صـــفر درجه و موقعیت n1.35، ۲/۱ درصد می‌باشد. هم‌چنین متوسط خطای سرعت طولی در مقطع ورودی برای پیش‌بینی مدل LES، ۴/۵ در صد اســـت که کمتر از خطای مدل RSM می باشـــد. n نشان‌دهنده‌ی جهت شعاعی می‌باشد. به‌طور مثال n1.35 به معنای فاصله‌ی ۱/۳۵ متری از مرکز پیچ می‌باشد و با توجه به این‌که دیواره‌ی داخلی با مرکز پیچ ۱/۰۵ متر فاصله دارد، n1.35 نشان‌دهنده‌ی موقعیت ۰/۳ متری از دیوار داخلی می‌باشـــد. هم‌چنین n1.7 نشـــان‌دهنده‌ی فاصـــله ۱/۷ متری از مرکز پیچ می‌باشـــد و موقعیت آن خط مرکزی کانال اســـت. n2.05 موقعیت ۰/۳ متری از دیواره‌ی خـــارجی و n2.2 موقعیـــت ۰/۱۵ متری از دیواره‌ی خارجی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ درصد اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده پروفیل سرعت طولی

زاویه مرکزی (درجه)	مدل	n1.35	n1.7	n2.05	n2.2	میانگین
۰	LES	۲/۱	۸/۲	۷/۳	۰/۴	۴/۵
	RSM	۰/۴	۱۱/۲	۱۱/۴	٦/۲	۷/۳
۳۰	LES	۱۲/٦	۵/٦	۵/۱	۴/۱	٦/۹
	RSM	۱۲/۲	۱۲	۹/۸	۵/۸	۱۰
٦۰	LES	----	۱۳	۰/۴	۹/٦	۷/۷
	RSM	----	۱۳	۱۱	۱۷	۱۳/۷
۹۰	LES	----	۹/۷	۸/۷	۱۹	۱۲/۵
	RSM	----	۱۰	۲/۹	۹/٦	۷/۵
۱۲۰	LES	۸/۴	۱۹	۱/۷	۱/۸	۷/۷
	RSM	۲۰	٦	۱۰	۴/۷	۱۰/۲
۱۵۰	LES	۱۲	۸	۱۳	۴/۸	۹/۵
	RSM	۱٦	۱۹	۱۲	۸/۲	۱۳/۸
۱۸۰	LES	۴/۴	۱۱/۵	۵	٦/۵	٦/۹
	RSM	۲۵	۷/۵	۵/۷	۳/۷	۱۰/۵

بر طبق جدول (۲) مدل LES با ۷/۹ درصـــد خطای میانگین کل مقاطع عرضی مقایسه شده، بهترین نتایج را دربرداشـــته اســـت. مدل RSM نیز دارای ۱۰/۴ درصـــد خطا می‌باشد. در هفت مقطع عرضی انتخاب شده، تنها در زاویه‌ی مرکزی ۹۰ درجه مدل LES خطای بیشتری را داراســـت؛ البته باید به این نکته توجه داشـــت، تنها خطای پیش‌بینی ۲٦ موقعیت مکانی در کانال بررســـی شـــده اســـت و اگر در زاویه‌ی مرکزی ۹۰ درجه موقعیت‌های دیگری انتخاب می‌شدند امکان تغییر نتایج وجود داشـــت و احتمالاً با افزایش تعداد پروفیل‌های ســـرعت طولی در این مقطع، مدل LES جواب بهتری می‌داد.

نتیجه‌گیری

برای بررســـی مدل های عددی آشـــفتگی جریان و مقایســـه‌ی نتایج آنها با داده‌های واقعی، از داده‌های یک آبراهه با پیچ تند و توپوگرافی توســـعه‌یافته اســـتفاده گردید. مطالعات آزمایشـــگاهی بر روی فلومی با شـــعاع انحنای ۱/۷ متر و با زاویه‌ی مرکزی ۱۹۳ درجه انجام شده است. جریان ٦۳ لیتر بر ثانیه بر روی رسوبات با قطر ۲ میلی‌متر اجرا شـــد که پس از این‌که توپوگرافی کاملاً توسعه یافت، برای انجام اندازه‌گیری‌ها رسوبات منجمد شـــد. برای تعیین الگوی جریان به‌وســـیله‌ی مدل‌های آشفتگی از نرم‌افزار فلوئنت و گمبیت استفاده گردید و مدل‌های آشفتگی RSM و LES مورد بررسی قرار گرفتند. بررســـی‌ها نشـــان داد که هر دو مدل تا حدودی الگوی کلی جریان را پیش‌بینی کرده‌اند اما بخش‌های مهم جریان به‌وســـیله‌ی مدل RSM به‌خوبی پیش‌بینی نشـــده بود. مدل RSM نتوانســـته بود منطقه‌ی جداشدگی جریان را به‌صورت مناسبی پیش‌بینی کند و به‌جای موقعیت زاویه‌ی ۷۵ درجه، زاویه‌ی ۸۵ درجه را به‌عنوان منطقه‌ی جداشـــدگی پیش‌بینی کرده‌اســـت. اما مدل LES موقعیت این ناحیه را به‌صـــورت مناســـبی پیش‌بینی کرد. هم‌چنین در پیش‌بینی موقعیت هســـته بیشـــینه‌ی ســـرعت طولی، مناســـب‌ترین پیش‌بینی برای مدل LES بوده است. در سرعت عرضی متوسط‌گیری

شده در عمق نیز، مدل LES تغییر جهت جریان عرضی و موقعیت آن را بهتر پیش‌بینی کرده است. نهایتاً خطای میانگین میزان اختلاف بین پروفیل‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شـــده برای مدل LES کمتر از ۸ درصـــد به‌دســـت آمد و این مدل دارای کمترین میزان خطا در پیش‌بینی بوده‌است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش از محل طرح پژوهشـــی داخلی دانشـــگاه اراک با موضـــوع «بررســـی مدل‌های آشـــفتگی در پیچ رودخانه با کمک نرم افزارFLUENT» تامین اعتبار شده اســـت. نویســـندگان بر خود لازم می‌دانند که از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه اراک قدردانی نمایند.

مراجع

1. Shettar, A.S., and Murthy, K.K., "A numerical study of division of flow in open channels", *Journal of Hydraulic Research,* Delft, The Netherlands, Vol. 34, No. 5, pp. 651-675, (1996).

۲. صفرزاده گندشمین، ا.، و صالحی نیشابوری، ع.ا.، "مطالعه‌ی عددی الگوی جریان آشفته و بررسی کیفی انتقال رسوب و فرسایش در آبگیری جانبی از رودخانه"، مجله‌ی فنی و مهندسی مدرس، شماره‌ی ۲۵، صص. ۱۸-۱، (۱۳۸۵).

۳. امید بیگی، م.ع.، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان در آبگیری جانبی از رودخانه در حضور صفحات مستغرق"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۸).

٤. شاملو، ح.، و پیرزاده، ب.، "بررسی اثرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در آبگیرهای جانبی به‌کمک نرم‌افزار فلوئنت"، نشریه‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، صص. ٤۸۷-٤۹۵، (۱۳۸۹).

5. Han, S.S., "Characteristics of flow around 90 open channel bends", PhD. Thesis. Dept. of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, (2010).

6. van Balen, W., Uijttewaal, W.S.J., and Blanckaert, K., "Large eddy simulation of a mildly curved open-channel flow", *J. Fluid Mech.,* Vol. 630, pp. 413-442, (2009).

7. Booij, R., "Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes", *J. Turbulence,* Vol. 4, No. 1, pp. 8-16, (2003).

8. Dargahi, B., "Three-dimensional flow modelling and sediment transport in the river Klarälven", Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 29, No. 7, pp. 821- 852, (2004).

9. Kang, H., and Choi, S., "Reynolds stress modelling of rectangular open-channel flow", *Intl. J. Num. Meth. Fluids,* Vol. 51, No. 11, pp. 1319-1334, (2006).

10. Khosronejad, A., Rennie, C.D., Neyshabouri, S.A.A.S., and Townsend, R.D., "3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends", *J. Hydraulic Eng.,* Vol. 133, No. 10, pp. 1123-1134, (2007).

11. Fluent Inc., "FLUENT 6.3 User's Guide", Lebanon, New Hampshire, United States of America, (2006).

12. Van Rijn, L.C., "Sediment transport, part 1: bed load transport", *J. Hydr. Eng.,* Vol. 110, No. 10, pp. 1431-1456, (1984).

13. Montazeri, M., and Hashemi, R., "3D numerical simulation of supercritical flow in bends of channel", *International conference on mechanical Engineering,* Dubai, (2012).